

引用格式:高志龙,霍柏琦,童一峻,等.基于无线温度监测的内燃机连杆轴瓦故障诊断技术研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(4):80-85.

GAO ZhiLong, HUO BaiQi, TONG YiJun, et al. Fault diagnosis of the connecting rod bush of internal combustion engines based on wireless temperature monitoring[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019,46(4):80-85.

# 基于无线温度监测的内燃机连杆轴瓦故障诊断技术研究

高志龙<sup>1,2</sup> 霍柏琦<sup>3</sup> 童一峻<sup>4</sup> 江志农<sup>1,2\*</sup>

(1.北京化工大学 机电工程学院 高端机械装备健康监控与自愈化北京市重点实验室,北京 100029;

2.北京化工大学 机电工程学院 发动机健康监控及网络化教育部重点实验室,北京 100029;

3.中国人民解放军 92942 部队,北京 100161; 4.中国船舶工业系统工程研究院,北京 100094)

**摘要:**针对内燃机连杆轴瓦故障频发且监测手段有限的技术难点,提出了基于无线温度监测的连杆轴瓦磨损类故障诊断方法。通过分析连杆轴瓦与轴径相对运动时的摩擦力学关系,在考虑润滑的前提下推导出轴瓦温升计算方程,作为基于温度监测的轴瓦故障诊断方法的理论依据;以 TBD234V12 型柴油机为对象,搭建连杆轴瓦故障模拟实验台模拟轴瓦磨损故障,并配置无线测温系统捕捉异常温度信号,对比正常情况下的温度信号可知,磨损的连杆轴瓦表面温度相比正常轴瓦温度有明显上升。理论和模拟实验结果表明,基于无线温度监测的内燃机连杆轴瓦故障诊断方法具有较高实用价值。

**关键词:**内燃机;连杆轴瓦;故障诊断;无线测温

**中图分类号:** TH165+.3 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.04.012

## 引言

内燃机作为一种重要的动力设备,被广泛用于工业生产和国防安全领域。连杆是内燃机的重要部件,用于连接活塞和曲轴,并将活塞的往复直线运动转化为曲轴的回转运动。由于载荷大、工况恶劣,内燃机连杆轴瓦极易发生故障,其失效的形式主要有磨粒磨损、疲劳剥落、烧蚀、胶合、穴蚀、滑移等,会造成轴瓦损坏甚至连杆或曲轴变形、断裂等危害,极大影响内燃机运行的可靠性和安全性<sup>[1-2]</sup>。因此,连杆轴瓦故障的监测诊断一直都是内燃机状态监测领域的重要研究内容。魏立队等<sup>[3]</sup>在广义 Reynolds

方程和 Green-wood/Tripp 接触理论的基础上,考虑温度、压力对轴瓦润滑的影响,对船用柴油机轴承的混合润滑进行了数值分析,通过模拟计算发现,结合轴颈中心轨迹和油膜压力梯度变化,能够更准确地预测轴承穴蚀的发生。王国威等<sup>[4]</sup>针对发动机振动信号的非平稳性,利用特征参数的模糊性特点,提出局域均值分解(LMD)和模糊C均值(FCM)聚类相结合的故障诊断方法,对连杆轴瓦故障进行特征提取和模式识别,实验表明该方法能有效地诊断柴油机连杆轴瓦故障。文献[5-6]通过进一步处理振动信号,借助频率阶次比、共振解调、小波包、支持向量等方法对连杆轴承故障进行了准确的诊断。Chen等<sup>[7]</sup>研究了连杆衬套松动的机理,通过热弹塑性模型利用有限元方法模拟计算了连杆衬套在不同状态下的接触力,发现过高的运行温度会导致装配接触力减小,进而引起连杆衬套松动故障,并通过实验验证了该结论。Yang等<sup>[8]</sup>借助计算机辅助和数值分析方法研究了连杆轴瓦穴蚀故障的原因,模拟

收稿日期:2018-11-18

基金项目:国家重点研发计划(2016YFF0203305);中央高校基本科研业务费(JD1912/ZY1940);双一流建设专项(ZD1601)

第一作者:男,1989年生,博士生

\*通信联系人

E-mail:jiangzhinong@263.net

结果显示局部区域产生的负压是导致该故障发生的主要原因,通过增加泄油孔、加宽油槽或提高进口油压的方式可有效避免此类故障。Jiang 等<sup>[9]</sup>研究了基于特定相位振动冲击的连杆衬套磨损故障诊断方法,通过仿真信号和实测信号的对比验证了该方法的正确性。

对于连杆轴瓦故障的监测,前人的研究主要集中在振动信号特征提取及分析识别方面,这些方法虽然在原理上具有可行性,并在实验环境下能取得一定效果,但由于内燃机零部件数量大、工况多变,振动传递路径复杂,振动信号中夹杂很多干扰信号,不利于工程实际应用。

温度指标是磨损类故障最重要的特征参数之一,异常磨损、变形、滑移均会产生大量热能,通过实时监测温度场变化情况可诊断连杆轴瓦是否发生故障。但由于连杆是运动部件且位于机器内部,内燃机内部空间封闭且狭小,加之曲轴箱内部温度较高,有大量油雾,对传感器的可靠性和安装方式要求更高,常规测温手段不适用。因此,目前内燃机连杆轴瓦温度尚无法得到有效监测。本文开发了一种可用于连杆轴瓦温度实时在线监测的新型无线测温系统,相对于其他无线测温技术,如红外、激光等,本文测量方式采用小型化、无源、无线的传感器,可实现嵌入式安装,能满足实际应用需求。

## 1 理论分析

内燃机在工作过程中,连杆随曲轴一起运动,当轴径与轴承孔分别以  $\omega_j$  和  $\omega_o$  角速度转动时,有效角速度  $\bar{\omega} = \omega_j + \omega_o - 2\delta'_c$ , 其中  $\delta'_c$  为轴心瞬时回转角速度。润滑油膜对工作表面的摩擦阻力可用式(1)~(5)求得<sup>[10]</sup>

轴径表面摩擦力

$$F_j = \frac{BD\eta}{\psi} \left[ S_{OT}\bar{\omega} \frac{\sin \theta}{2} + (\omega_j - \omega_o) \frac{\pi}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right] \quad (1)$$

轴承孔表面摩擦力

$$F_o = \frac{BD\eta}{\psi} \left[ S_{OT}\bar{\omega} \frac{\sin \theta}{2} - (\omega_j - \omega_o) \frac{\pi}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right] \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\Delta}{D} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{e}{\Delta/2} \quad (4)$$

$$S_{OT} = \frac{p_t \psi^2}{BD\bar{\omega}} \quad (5)$$

式中,  $B$  为轴瓦宽度,  $D$  为轴承孔径,  $\eta$  为滑油动力黏度,  $\psi$  为相对间隙,  $\Delta$  为轴承间隙,  $\varepsilon$  为偏心率,  $e$  为偏心距,  $\theta$  为油膜压力总和与偏心线之间的夹角,  $S_{OT}$  为油膜旋转承载能力系数,  $p_t$  为纯旋转油膜总压力。

当轴径、轴承孔都作转动运动时,外界消耗于轴承中的摩擦功率  $N$  为轴径、轴承孔各自消耗的摩擦功率  $N_j$ 、 $N_o$  之和。

对于连杆大端轴瓦,其摩擦功率包含了  $N_j$  与  $N_o$  两项,由于  $N_o$  较小可忽略不计,则连杆大端轴瓦摩擦功率计算式为

$$N = N_j + N_o = \frac{D\omega_j F_j}{2} = \frac{D\omega_j}{2} \frac{BD\eta}{\psi} \left[ S_{OT}\bar{\omega} \frac{\sin \theta}{2} + (\omega_j - \omega_o) \frac{\pi}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right] = \frac{BD^2\omega_j\eta}{2\psi} \left[ \frac{p_t\psi^2\varepsilon}{BD} \frac{\sin \theta}{2} + (\omega_j - \omega_o) \frac{\pi}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right] \quad (6)$$

内燃机连杆轴承滑油流量  $Q$  由因旋转形成的流量  $Q_1$ 、因挤压形成的流量  $Q_2$  以及因供油压力形成的流量  $Q_3$  3 部分组成,公式如下

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

$$Q_1 = \frac{q_t D^3 \psi \bar{\omega}}{8} \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{q_r D^3 \psi \varepsilon'}{8} \quad (9)$$

$$Q_3 = \frac{q_p D^3 \psi^3 p_0}{8\eta} \quad (10)$$

式中,  $q_t$  为旋转效应流量系数,  $q_r$  为挤压效应流量系数,  $q_p$  为供油压力流量系数,均可通过查表或公式计算确定;  $p_0$  为供油压力,为已知的设计参数,  $\varepsilon'$  为  $\varepsilon$  对时间的导数。

假定轴瓦摩擦产生的热量均由润滑油吸收,则其温升可由式(11)计算<sup>[10]</sup>

$$\Delta T = \frac{A}{C\rho} \frac{N}{Q} \times 10^3 \quad (11)$$

式中,  $A$  为热功当量,  $A = 1/427$ ;  $C$  为润滑油比热;  $\rho$  为润滑油密度;  $Q$  为工作过程中润滑油的平均流量。由公式(11)可知,温升  $\Delta T$  与摩擦功率  $N$  成正比,与润滑油流量  $Q$  成反比。当轴瓦发生异常磨损、拉伤、变形、滑移、挤压时,油膜压力增大,偏心率  $\varepsilon$  减小,摩擦功率  $N$  随之增大。同时因  $\varepsilon$  减小,旋转效

应流量系数 $q_i$ 、挤压效应流量系数 $q_r$ 及供油压力流量系数 $q_p$ 均减小,对应的旋转流量 $Q_1$ 、挤压流量 $Q_2$ 及供油压力流量 $Q_3$ 也变小,因此润滑油总流量 $Q$ 变小。即轴瓦发生异常磨损、变形时,摩擦功率 $N$ 变大,滑油总流量 $Q$ 变小,温升 $\Delta T$ 变大。这一结论为利用温度变化诊断内燃机连杆轴瓦磨损类故障提供了理论依据。

2 实验验证

2.1 柴油机实验台

为了验证第 1 节理论分析结果,以 TBD234V12 型柴油机为主体搭建内燃机连杆轴瓦故障模拟实验台,其结构示意图如图 1 所示,实验台主要参数如表 1 所示。通过人为破坏的方式,将连杆轴瓦表面划伤,设置正常和异常对比组进行实验验证。在实验台上配置无线测温系统实时采集轴瓦温度数据。

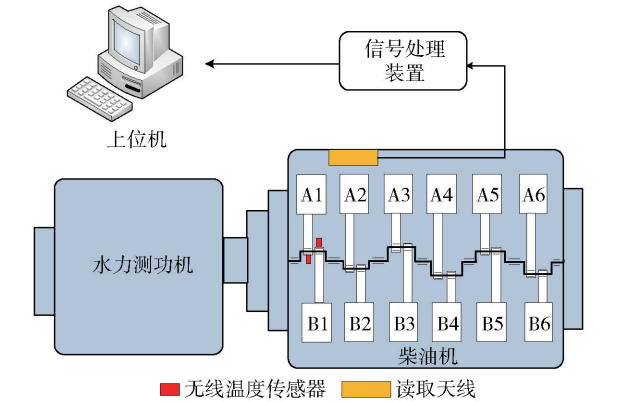


图 1 实验台结构示意图

Fig. 1 Layout of the test-bed

表 1 柴油机实验台主要参数

Table 1 Main parameters of the diesel engine test-bed

参数	数值
气缸数量	12
气缸排列形式	V 型, 60°夹角
持续功率/kW	373
持续转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 500
气缸直径/mm	128
气缸冲程/mm	135
发火顺序	B1-A1-B5-A5-B3-A3- B6-A6-B1-A2-B4-A4

2.2 无线测温系统

2.2.1 系统结构

搭建一套连杆轴瓦温度无线监测系统,硬件系

统主要包括无线测温传感器、读取天线、信号处理装置、上位机等,系统结构示意图如图 2 所示。

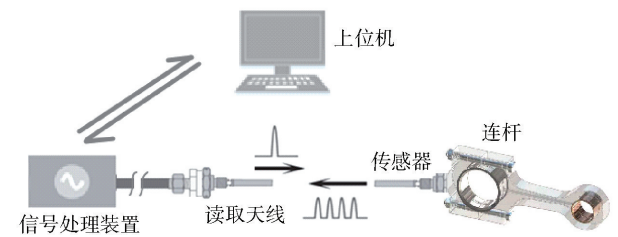


图 2 无线测温系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the wireless temperature measurement system

2.2.2 无线测温原理

本文系统借助声表面波技术进行温度测量。温度变化导致传感器晶体上传播的声波速度发生变化,二者呈线性关系,通过叉指换能器将声波转换为电磁波,从而使探头返回的回波信号具有温度特征;再由信号处理装置通过检测传感器返回的电磁波频率变化来实时监测被测物体的温度。无线测温传感器工作原理如图 3 所示。

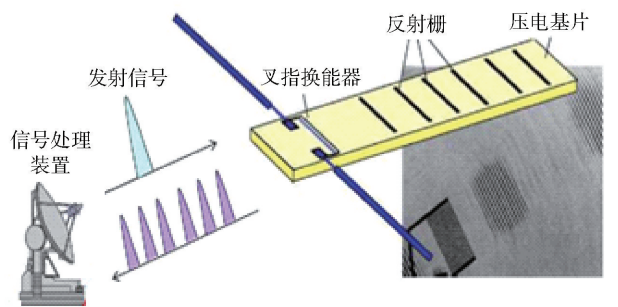


图 3 无线测温传感器工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the working principle of the wireless temperature sensors

2.2.3 无线测温传感器及其安装布局

传感器本体采用 L 型结构的铜质材料,其质量较轻,经理论计算可大幅度降低安装传感器引起的不平衡力;同时由于其热导率高、温度响应速度快,可迅速感知温度变化。传感器以螺纹的形式安装在连杆轴瓦下半瓦的最低点,确保无线信号不被连杆阻隔,正常传输。传感器安装位置如图 4 所示。

2.2.4 信号处理装置与上位机

信号处理装置作为信号发生、接收、解析、处理和转换的媒介,连接着读取天线和上位机,其中读取天线用于发射和接收无线信号,通过螺钉固定方式安装在柴油机曲轴箱的内壁,安装位置和传感器之间的最远距离不超过 0.5 m,以保证无线信号传输



质量和稳定性。读取天线上的线缆通过走线孔与信号处理装置连接。信号处理装置和上位机置于柴油机旁边,并接入 AC220V 电源,只要保证外部供电即可实现实时在线长周期测试。信号处理装置的输入线缆直接接入上位机。实验装置现场布局如图 5 所示。

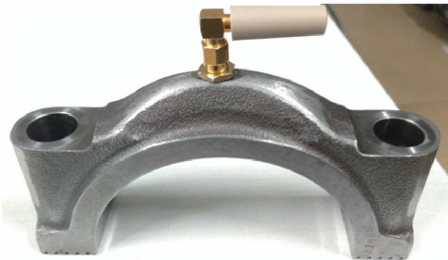


图 4 传感器安装

Fig. 4 Installation position of the sensor

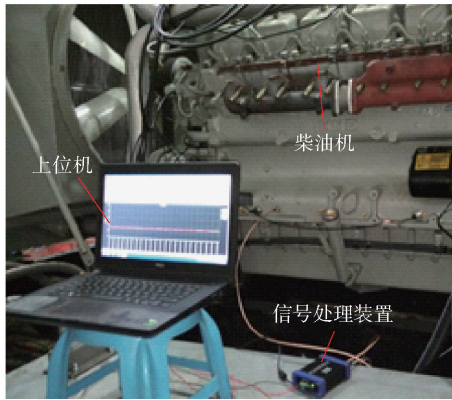


图 5 无线测温实验装置

Fig. 5 The test device for wireless temperature measurement

2.3 实验方法

在停机状态下,将实验台柴油机润滑油放掉,拆下油底壳,露出曲轴。同一曲拐上的两个相邻轴瓦的润滑条件、温度等外界环境基本相似,故选择位于同一曲拐上的 A1 和 B1 进行实验。拧松 A1 缸和 B1 缸的连杆螺栓,去除连杆大端下半部分,并晃动取出对应的轴瓦。对 B1 缸连杆大端轴瓦进行打磨,人为磨坏其表面合金层,磨掉约 0.5 mm 厚的金属,直到露出底层黄铜。破坏的轴瓦与正常轴瓦对比如图 6 所示。

在取出的连杆大端圆弧最低点打螺纹孔,将传感器安装于孔内,通过螺纹连接的形式与连杆大端固定。传感器安装完毕后,将破坏后的轴瓦装回 B1 连杆座孔内,按照标准规定力矩拧紧连杆螺栓,传感器安装情况如图 7 所示。

将柴油机重新装配好,检查无误后开机运行。

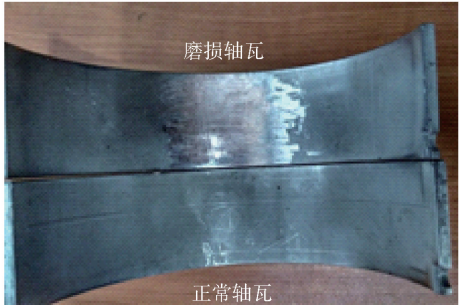


图 6 磨损轴瓦与正常轴瓦对比

Fig. 6 Wear bearing bush compared to normal bearing bush



图 7 传感器实际安装

Fig. 7 Actual installation of the sensors

为了确保故障模拟实验处于可控状态,防止对实验台造成不可逆损害,机组在无负载状态下运行,转速从 0 逐渐升至 1500 r/min。实时监测记录 A1 与 B1 连杆轴承温度,当温度保持稳定后停止实验,待机器温度降至室温后重复实验,共进行 3 组,每组持续约 0.5 h。通过正常轴瓦和磨损轴瓦在柴油机运行过程中表面温升的变化情况,验证理论分析的正确性。

2.4 实验结果与分析

将实验所得 3 组温度数据绘制成雷达图,如图 8 所示。从图 8(a)中可以看出,实验起始时刻 A1 和 B1 缸连杆轴瓦表面温度曲线基本重合,说明两者温度大致相同,与当时实验室环境温度一致(约 20 ℃)。随着机组的运转,两者温度不断升高,并逐渐出现温度差,差值不断扩大,最后稳定在一定范围内。实验结束时,故障轴瓦温度为 69.1 ℃,正常轴瓦温度为 60.8 ℃,温差最大为 8.3 ℃。图 8(b)、(c)的实验结果与图 8(a)类似,只是由于第 2、3 组实验时间为上午,起始温度较低(约 10 ℃),故实验结束时的温度比第 1 组实验低,但故障组和正常组同样存在较大温度差,不影响实验结论。

上述实验结果说明,随着机组不断运行,冷却水

温度、滑油温度逐渐升高,柴油机内部温度升高,相应的连杆轴瓦温度也随之升高,而故障状态下的连杆轴瓦比正常状态下的温升幅度大。

根据第 1 节的理论分析可知,当轴瓦发生异常磨损时,油膜压力增大,偏心率减小,摩擦功率随之增大。同时,滑油总流量变小,故产生的热量变多,温升变大。实际实验过程中,由于 B1 缸轴瓦被人为破坏,会发生异常磨损,而测得的其表面温升相对 A1 缸连杆轴瓦有明显增大,这与理论分析结果相吻合,进一步验证了本文方法的正确性。

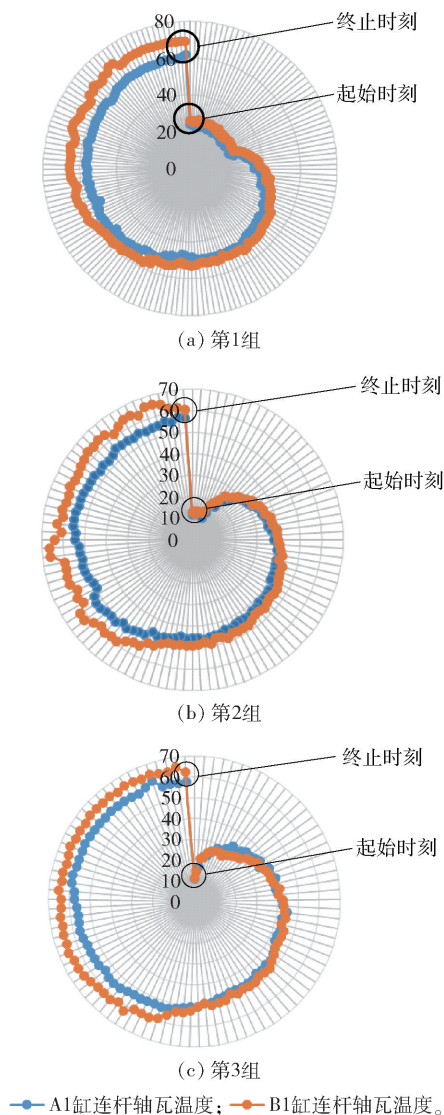


图 8 3 组测温实验数据雷达图

Fig. 8 The radar chart of the three sets of temperature test data

### 3 结论

(1) 连杆轴瓦发生异常磨损、变形破坏时,摩擦

功率变大,滑油流量变小,温升变大,证明温升指标可作为连杆轴瓦磨损类故障监测诊断指标。

(2) 内燃机运行时,相同工况下磨损的连杆轴瓦温度升高速度和幅度比正常轴瓦的要高,且随着实验的进行,二者温差逐渐扩大直至趋于稳定。据此,可对连杆轴瓦磨损故障进行预警。

(3) 搭建的无线温度监测系统取得了良好的实验效果,解决了旋转机械温度动态测试技术难题,为该技术在内燃机状态监测与故障诊断领域的推广应用奠定了一定基础。

### 参考文献:

- [1] 严新平, 李志雄, 张月雷, 等. 船舶柴油机摩擦磨损监测与故障诊断关键技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2013, 24(10): 1413-1419.  
YAN X P, LI Z X, ZHANG Y L, et al. Study on key techniques of wear monitoring and fault diagnosis for marine diesel engines: a review [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(10): 1413-1419. (in Chinese)
- [2] LAMARIS V, HOUNTALAS D. A general purpose diagnostic technique for marine diesel engines—application on the main propulsion and auxiliary diesel units of a marine vessel[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(4): 740-753.
- [3] 魏立队, 段树林, 邢辉, 等. 船舶柴油机主轴承热弹性流体动力混合润滑分析[J]. 内燃机学报, 2013, 31(2): 183-191.  
WEI L D, DUAN S L, XING H, et al. Thermo-elasto-hydrodynamic behavior of main bearings of marine diesel engines in mixed lubrication [J]. Transactions of CSICE, 2013, 31(2): 183-191. (in Chinese)
- [4] 王国威, 常春, 曾锐利, 等. 基于 LMD 和模糊 C 均值聚类算法的发动机连杆轴承故障诊断[J]. 军事交通学院学报, 2014, 16(9): 31-35.  
WANG G W, CHANG C, ZENG R L, et al. Fault diagnosis of connecting rod bearing based on LMD and fuzzy C mean clustering algorithm [J]. Journal of Military Transportation University, 2014, 16(9): 31-35. (in Chinese)
- [5] 程利军, 张英堂, 李志宁, 等. 基于阶比跟踪及共振解调的连杆轴承故障诊断研究[J]. 内燃机工程, 2012, 33(5): 67-73.  
CHENG L J, ZHANG Y T, LI Z N, et al. Research on fault diagnosis of connecting rod bearing based on order tracking and resonance demodulation [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(5): 67-

73. (in Chinese)
- [6] 常春, 王国威, 梅检民, 等. 基于小波包-AR 谱和支持向量机的连杆轴承故障诊断[J]. 军事交通学院学报, 2015, 17(4): 40-44.
- CHANG C, WANG G W, MEI J M, et al. Connecting rod bearing fault diagnosis based on the wavelet packet-auto regressive model spectrum and support vector machine [J]. Journal of Military Transportation University, 2015, 17(4): 40-44. (in Chinese)
- [7] CHEN G H, LIAO R D, JIANG X. Calculation and study of the failure of the connecting-rod small end based on thermoelastic plasticity[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2016, 231(11): 1489-1499.
- [8] YANG K, OUYANG G Y, YI T L, et al. Computer aided numerical analysis upon the connecting rod bearing cave corroding fault [C]//IEEE 2009 WASE International Conference on Information Engineering. Taiyuan, 2009: 414-417.
- [9] JIANG Z N, MAO Z W, ZHANG Y D, et al. A study on dynamic response and diagnosis method of the wear on connecting rod bush [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2017, 17(4): 812-822.
- [10] 熊林. 船用柴油机设计手册: (五)船用柴油机主要零部件 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 557-596.
- XIONG L. Design manual of diesel engine: (part 5) Main components of marine diesel engine [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1982: 557-596. (in Chinese)

## Fault diagnosis of the connecting rod bush of internal combustion engines based on wireless temperature monitoring

GAO ZhiLong<sup>1,2</sup> HUO BaiQi<sup>3</sup> TONG YiJun<sup>4</sup> JIANG ZhiNong<sup>1,2\*</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Health Monitoring Control and Fault Self-Recovery for High-end Machinery, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029; 2. Key Laboratory of Engine Health Monitoring-Control and Networking, Ministry of Education, College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029; 3. The 92942 Troop of Chinese People's Liberation Army, Beijing 100161; 4. System Engineering Research Institute, CSSC, Beijing 100094, China)

**Abstract:** In the light of the technical difficulties arising from the frequent failures of engine connecting rod bearing bushes and limitations in existing monitoring methods, a fault diagnosis method for connecting rod bearing bushes based on wireless temperature monitoring is proposed. By establishing a friction mathematical model of a connecting rod bearing bush and a crankpin, the equation for the bearing temperature rise has been derived under the premise of sufficient lubrication, which provides a theoretical basis for a diagnosis method based on temperature monitoring. An engine connecting rod bearing fault simulation test bench was built with a TBD234V12 diesel engine to simulate the bush wear failure tests, and a new wireless temperature monitoring system was equipped to capture the abnormal temperature signals. Compared with the normal temperature signal, the surface temperature of the worn connecting rod bearing bush has a significantly elevated temperature. The theoretical and experimental results show that our fault diagnosis method for a connecting rod bearing based on wireless temperature monitoring has high practicability.

**Key words:** internal combustion engine; connecting rod bush; fault diagnosis; wireless temperature monitoring

(责任编辑: 汪 琴)